

RAMAN AMPLIFIER, METHOD FOR CONTROLLING RAMAN AMPLIFIER AND OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM

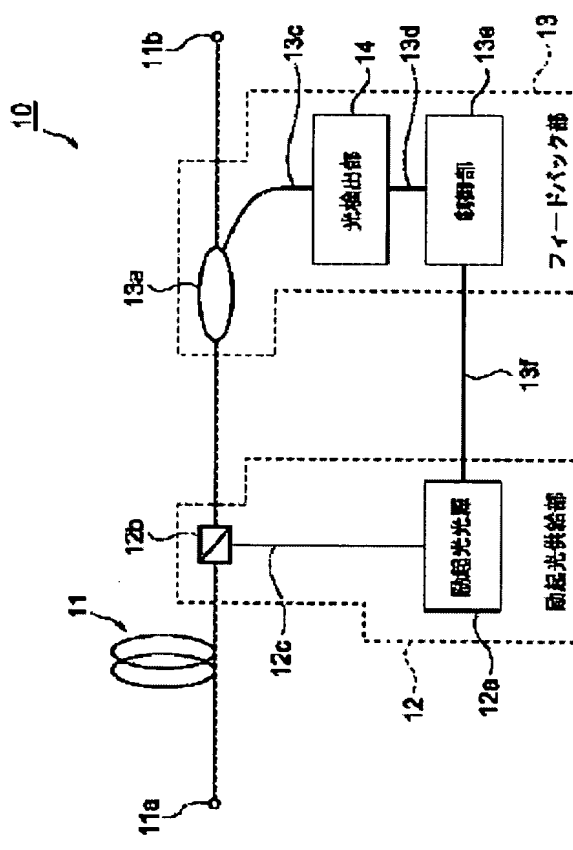
Patent number: JP2003057692
Publication date: 2003-02-26
Inventor: INOUE MASAYUKI; KADOI MOTOTAKA
Applicant: SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES
Classification:
- international: G02F1/35; H01S3/10; H01S3/30; H04B10/16; H04B10/17; G02F1/35; H01S3/10; H01S3/30; H04B10/16; H04B10/17; (IPC1-7): G02F1/35; H01S3/10; H01S3/30; H04B10/16; H04B10/17
- european:
Application number: JP20020152886 20020527
Priority number(s): JP20020152886 20020527; JP20010172139 20010607

Report a data error here

Abstract of JP2003057692

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a Raman amplifier, etc., provided with a structure that keeps the flatness of power spectrum of Raman-amplified signal light that is subjected to Raman amplification.

SOLUTION: This Raman amplifier comprises an optical fiber (11) for Raman- amplifying a plurality of signal channels of signal light having respective center optical frequencies different from each other, a pumping light supplying part (12) for supplying N (N being an integer of 2 or more) pumping channels of pumping light having respective center optical frequencies different from each other to the optical fiber, and feedbacking part (13) for dividing detected Raman- amplified signal light into N optical frequency ranges defined so as to include one Raman amplification peak as an optical frequency lower than respective center optical frequencies of the pumping channels by an optical frequency shift of about 15 THz, and controlling the pumping light supplying part such that the Raman-amplified signal light has a power fluctuation of 2 dB or less in each of thus divided N optional frequency ranges.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 互いに中心光周波数の異なる複数信号チャネルの信号光をラマン増幅するための光ファイバと、互いに中心光周波数の異なる N (2 以上の整数) 個の励起チャネルの励起光を前記光ファイバに供給する励起光供給部と、

前記励起光が供給されることにより前記光ファイバ内においてラマン増幅されたラマン増幅信号光の一部を検出し、その検出結果に基づいて該ラマン増幅信号光のパワースペクトルが光周波数方向に対して実質的に平坦な

よう前記励起光供給部を制御するフィードバック部とを備え、
前記フィードバック部は、前記検出されたラマン増幅信号光を前記励起光の励起チャネルそれぞれの中心光周波数から 13.5~15.7 THz の光周波数シフト分だけ小さい光周波数となるラマン増幅ピークを 1 つ含むよう規定された N 個の光周波数範囲に区分し、該区分された N 個の光周波数範囲それぞれにおけるラマン増幅信号光のパワーバラツキが 2 dB 以下になるよう前記励起光供給部を制御するラマン増幅器。

【請求項 2】 前記フィードバック部は、前記区分された N 個の光周波数範囲それぞれにおけるラマン増幅信号光のパワーバラツキが 1 dB 以下になるよう、前記励起光供給部を制御することを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 3】 前記フィードバック部は、前記ラマン増幅信号光のパワーとともに前記励起チャネルの各中心光周波数における励起光パワーをモニタする光検出部と、前記光検出部の検出結果に基づいて、前記ラマン増幅信号光を該励起チャネルと同数の光周波数範囲に区分する際、該光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数を決定する制御部とを備えたことを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 4】 前記制御部は、前記光検出部の検出結果に基づいて、ラマン増幅に実効的に寄与しない程度の微弱なパワーの励起チャネルの発生を検出したとき、該微弱パワーの励起チャネルを除いた残りの励起チャネルを利用して、前記光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数を変更することを特徴とする請求項 3 記載のラマン増幅器。

【請求項 5】 前記制御部は、前記光検出部の検出結果に基づいて、ラマン増幅に実効的に寄与し得る程度の強力なパワーの励起チャネルの発生を検出したとき、該強力パワーの励起チャネルを含めた全励起チャネルを利用して、前記光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数を変更することを特徴とする請求項 3 記載のラマン増幅器。

【請求項 6】 前記光検出部は、複数信号チャネルの前記ラマン増幅信号光と複数励起チャネルの前記励起光が多重化された多重化モニタ光を検出するオプティカルパ

フォーマンスモニタを含むことを特徴とする請求項 3 記載のラマン増幅器。

【請求項 7】 前記整数 $N=2$ のとき、
前記フィードバック部が前記ラマン増幅信号光を検出する際に区分する前記 N 個の光周波数範囲のうち第 1 番目の光周波数範囲は、前記 N 個の励起チャネルのうち大きい方の第 1 中心光周波数と小さい方の第 2 中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を下限とする一方、該第 1 中心光周波数と該中間光周波数との差だけ該第 1 中心光周波数よりも大きい光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を上限とする範囲であり、そして、前記フィードバック部が前記ラマン増幅信号光を検出する際に区分する前記 N 個の光周波数範囲のうち第 2 番目の光周波数範囲は、前記第 1 中心光周波数と第 2 中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を上限とする一方、該第 2 中心光周波数と該中間光周波数との差だけ該第 2 中心光周波数よりも小さい光周波数から前記光周波数シフト分だけさらに小さい光周波数を下限とする範囲であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 8】 前記整数 N が 3 以上であって、前記励起光における N 個の励起チャネルのうち最も中心光周波数の大きい励起チャネルを第 1 励起チャネルとし、中心光周波数の大きい方から第 n (2 以上の整数) 番目の中心光周波数の励起チャネルを第 n 励起チャネルとし、そして、最も中心光周波数の小さい励起チャネルを第 N 励起チャネルとするとき、

前記フィードバック部が前記ラマン増幅信号光を検出する際に区分する前記 N 個の光周波数範囲のうち第 1 番目の光周波数範囲は、前記第 1 励起チャネルの中心光周波数と第 2 励起チャネルの中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を下限とする一方、該第 1 励起チャネルの中心光周波数と該中間光周波数との差だけ該第 1 励起チャネルの中心光周波数よりも大きい光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を上限とする範囲であり、

前記フィードバック部が前記ラマン増幅信号光を検出する際に区分する前記 N 個の光周波数範囲のうち第 n (2 以上 ($N-1$) 以下の整数) 番目の光周波数範囲は、前記第 n 励起チャネルの中心光周波数と第 ($n+1$) 励起チャネルの中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を下限とする一方、該第 n 励起チャネルの中心光周波数と第 ($n-1$) 励起チャネルの中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を上限とする範囲であり、

前記フィードバック部が前記ラマン増幅信号光を検出する際に区分する前記 N 個の光周波数範囲のうち第 N 番目の光周波数範囲は、前記第 N 励起チャネルの中心光周波

10

20

30

40

50

数と第 (N-1) 励起チャンネルの中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を上限とする一方、該第 N 励起チャンネルの中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第 N 励起チャンネルの中心光周波数よりも小さい光周波数から前記光周波数シフト分だけさらに小さい光周波数を下限とする範囲であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 9】 前記励起光における各励起チャンネルの中心光周波数の間隔は、4 THz 以下であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 10】 前記フィードバック部は、前記ラマン増幅信号光の一部を受光し、該ラマン増幅信号光のパワーに応じた電気信号を出力する光検出部と、前記光検出部から出力された電気信号に従って励起光供給部を制御する制御部とを備えることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 11】 前記光検出部は、オブティカルパフォーマンスモニタを含むことを特徴とする請求項 10 記載のラマン増幅器。

【請求項 12】 前記光検出部は、前記ラマン増幅信号光を前記 N 個の光周波数範囲に分波する分波部と、前記分波部により分波されたラマン増幅信号光それぞれを受光する受光部とを備えることを特徴とする請求項 10 記載のラマン増幅器。

【請求項 13】 前記分波部は、誘電体光学フィルタを備えた光回路、及び、光サーキュレータとブラッグ回折格子を備えた光回路のいずれかを含むことを特徴とする請求項 12 記載のラマン増幅器。

【請求項 14】 互いに中心光周波数の異なる複数信号チャンネルの信号光をラマン増幅するための光ファイバと、励起光供給部とを少なくとも備えたラマン増幅器の制御方法であって、

互いに中心光周波数の異なる N (2 以上の整数) チャンネルの励起光を前記ラマン増幅用光ファイバに供給し；前記励起光が供給されることで前記ラマン増幅用光ファイバ内においてラマン増幅されたラマン増幅信号光の一部を検出し、

前記検出されたラマン増幅信号光を前記励起光のチャンネルそれぞれの中心光周波数から 13.5 ~ 15.7 THz の光周波数シフト分だけ小さい光周波数となるラマン増幅ピークを 1 つ含むよう規定された N 個の光周波数範囲に区分し、前記励起光供給部を制御することにより、該区分された N 個の光周波数範囲それぞれにおけるラマン増幅信号光のパワーバラツキを 2 dB 以下に抑えるラマン増幅器の制御方法。

【請求項 15】 前記励起光供給部は、前記区分された N 個の光周波数範囲それぞれにおけるラマン増幅信号光のパワーバラツキが 1 dB 以下に抑えられるよう制御されることを特徴とする請求項 14 記載のラマン増幅器の制御方法。

【請求項 16】 前記ラマン増幅信号光が前記励起チャンネルと同数の光周波数範囲に区分される際、該励起チャンネルの各中心光周波数における励起光パワーの検出結果に基づいて、該光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数が決定されることを特徴とする請求項 14 記載のラマン増幅器の制御方法。

【請求項 17】 前記励起チャンネルのうちラマン増幅に実効的に寄与しない程度の微弱なパワーの励起チャンネルの発生が検出されたとき、該微弱パワーの励起チャンネルを除いた残りの励起チャンネルを利用して、前記光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数が変更されることを特徴とする請求項 16 記載のラマン増幅器の制御方法。

【請求項 18】 前記励起チャンネルのうちラマン増幅に実効的に寄与し得る程度の強力なパワーの励起チャンネルの発生が検出されたとき、該強力パワーの励起チャンネルを含む全励起チャンネルを利用して、前記光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数が変更されることを特徴とする請求項 16 記載のラマン増幅器の制御方法。

【請求項 19】 前記整数 N = 2 のとき、

20 前記フィードバック部が前記ラマン増幅信号光を検出する際に区分する前記 N 個の光周波数範囲のうち第 1 番目の光周波数範囲は、前記 N 個の励起チャンネルのうち大きい方の第 1 中心光周波数と小さい方の第 2 中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を下限とする一方、該第 1 中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第 1 中心光周波数よりも大きい光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を上限とする範囲であり、

30 前記フィードバック部が前記ラマン増幅信号光を検出する際に区分する前記 N 個の光周波数範囲のうち第 2 番目の光周波数範囲は、前記第 1 中心光周波数と第 2 中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を上限とする一方、該第 2 中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第 2 中心光周波数よりも小さい光周波数から前記光周波数シフト分だけさらに小さい光周波数を下限とする範囲であることを特徴とする請求項 14 記載のラマン増幅器の制御方法。

【請求項 20】 前記整数 N が 3 以上であって、前記励起光における N 個の励起チャンネルのうち最も中心光周波数の大きい励起チャンネルを第 1 励起チャンネルとし、中心光周波数の大きい方から第 n (2 以上の整数) 番目の中心光周波数の励起チャンネルを第 n 励起チャンネルとし、そして、最も中心光周波数の小さい励起チャンネルを第 N 励起チャンネルとするとき、

50 前記フィードバック部が前記ラマン増幅信号光を検出する際に区分する前記 N 個の光周波数範囲のうち第 1 番目の光周波数範囲は、前記第 1 励起チャンネルの中心光周波数と第 2 励起チャンネルの中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を下限とする一方、該第 1 励起チャンネルの中心光周波数と該中間

周波数との差だけ該第1励起チャンネルの中心光周波数よりも大きい光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を上限とする範囲であり、
前記フィードバック部が前記ラマン増幅信号光を検出する際に区分する前記N個の光周波数範囲のうち第n(2以上(N-1)以下の整数)番目の光周波数範囲は、前記第n励起チャンネルの中心光周波数と第(n+1)励起チャンネルの中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を下限とする一方、該第n励起チャンネルの中心光周波数と第(n-1)励起チャンネルの中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を上限とする範囲であり、
前記フィードバック部が前記ラマン増幅信号光を検出する際に区分する前記N個の光周波数範囲のうち第N番目の光周波数範囲は、前記第N励起チャンネルの中心光周波数と第(N-1)励起チャンネルの中心光周波数との中間光周波数から前記光周波数シフト分だけ小さい光周波数を上限とする一方、該第N励起チャンネルの中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第N励起チャンネルの中心光周波数よりも小さい光周波数から前記光周波数シフト分だけさらに小さい光周波数を下限とする範囲であることを特徴とする請求項14記載のラマン増幅器の制御方法。

【請求項21】 請求項1～13のいずれか一項記載のラマン増幅器を含む光通信システム。

【請求項22】 互いに中心光周波数の異なる複数信号チャンネルの信号光をラマン増幅するための光ファイバと、
互いに中心光周波数の異なるN(2以上の整数)個の励起チャンネルの励起光を前記光ファイバに供給する励起光供給部と、
前記励起光が供給されることにより前記光ファイバ内においてラマン増幅されたラマン増幅信号光の一部を検出し、その検出結果に基づいて該ラマン増幅信号光のパワースペクトルが光周波数方向に対して実質的に平坦になるよう前記励起光供給部を制御するフィードバック部とを備え、
前記フィードバック部は、前記検出されたラマン増幅信号光を前記励起光の励起チャンネル数と同数の光周波数範囲に区分し、該区分された光周波数範囲それぞれに含まれるラマン増幅信号光のパワー平均値バラツキが2dB以下になるよう前記励起光供給部を制御するラマン増幅器。

【請求項23】 前記フィードバック部は、前記区分された光周波数範囲それぞれに含まれるラマン増幅信号光のパワー平均値バラツキが1dB以下になるよう、前記励起光供給部を制御することを特徴とする請求項22記載のラマン増幅器。

【請求項24】 前記フィードバック部は、前記ラマン

増幅信号光のパワーとともに前記励起チャンネルの各中心光周波数における励起光パワーをモニタする光検出部と、前記光検出部の検出結果に基づいて、前記ラマン増幅信号光を該励起チャンネルと同数の光周波数範囲に区分する際、該光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数を決定する制御部とを備えたことを特徴とする請求項22記載のラマン増幅器。

【請求項25】 前記制御部は、前記光検出部の検出結果に基づいて、ラマン増幅に実効的に寄与しない程度の微弱なパワーの励起チャンネルの発生を検出したとき、該微弱パワーの励起チャンネルを除いた残りの励起チャンネルを利用して、前記光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数を変更することを特徴とする請求項24記載のラマン増幅器。

【請求項26】 前記制御部は、前記光検出部の検出結果に基づいて、ラマン増幅に実効的に寄与し得る程度の強力なパワーの励起チャンネルの発生を検出したとき、該強力パワーの励起チャンネルを含む全励起チャンネルを利用して、前記光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数を変更することを特徴とする請求項24記載のラマン増幅器。

【請求項27】 前記光検出部は、複数信号チャンネルの前記ラマン増幅信号光と複数励起チャンネルの前記励起光が多重化された多重化モニタ光を検出するオプティカルパフォーマンスモニタを含むことを特徴とする請求項24記載のラマン増幅器。

【請求項28】 請求項22～27のいずれか一項記載のラマン増幅器を含む光通信システム。

【請求項29】 互いに中心光周波数の異なる複数信号チャンネルの信号光をラマン増幅するための光ファイバと、励起光供給部とを少なくとも備えたラマン増幅器の制御方法であって、

互いに中心光周波数の異なるN(2以上の整数)チャンネルの励起光を前記ラマン増幅用光ファイバに供給し、
前記励起光が供給されることで前記ラマン増幅用光ファイバ内においてラマン増幅されたラマン増幅信号光の一部を検出し、

前記検出されたラマン増幅信号光を前記励起光の励起チャンネル数と同数の光周波数範囲に区分し、前記励起光供給部を制御することにより、該区分された光周波数範囲それぞれに含まれるラマン増幅信号光のパワー平均値バラツキが2dB以下に抑えるラマン増幅器の制御方法。

【請求項30】 前記励起光供給部は、前記区分されたN個の光周波数範囲それぞれに含まれるラマン増幅信号光のパワー平均値バラツキが1dB以下に抑えられるよう制御されることを特徴とする請求項29記載のラマン増幅器の制御方法。

【請求項31】 前記ラマン増幅信号光が前記励起チャンネルと同数の光周波数範囲に区分される際、該励起チャンネルの各中心光周波数における励起光パワーの検出結果

10

20

30

40

50

に基づいて、該光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数が決定されることを特徴とする請求項2記載のラマン増幅器。

【請求項32】 前記励起チャンネルのうちラマン増幅に実効的に寄与しない程度の微弱なパワーの励起チャンネルの発生が検出されたとき、該微弱パワーの励起チャンネルを除いた残りの励起チャンネルを利用して、前記光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数が変更されることを特徴とする請求項31記載のラマン増幅器の制御方法。

【請求項33】 前記励起チャンネルのうちラマン増幅に実効的に寄与し得る程度の強力なパワーの励起チャンネルの発生が検出されたとき、該強力パワーの励起チャンネルを含む全励起チャンネルを利用して、前記光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数が変更されることを特徴とする請求項31記載のラマン増幅器の制御方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、ラマン散乱効果を利用して複数信号チャンネルの信号光をラマン増幅するラマン増幅器、このラマン増幅器の制御方法、及びこのラマン増幅器を含む光通信システムに関するものである。

【0002】

【従来の技術】光通信システムの情報伝送能力向上を目的として信号光の波長分割多重(WDM:Wavelength Division Multiplexing)伝送が広く普及し、このような光通信システムでは、伝送途中で該信号光直接増幅する光増幅器が利用される。ここで、光増幅器は増幅が広い波長範囲(光周波数範囲)で得られることと、該波長範囲(光周波数範囲)における増幅された信号光のパワースペクトルが平坦になることが重要である。光増幅器としては、希土類元素添加光ファイバ増幅器、ラマン増幅器などの光ファイバ増幅器が一般的である。

【0003】光ファイバ増幅器の一方のタイプである希土類元素添加光ファイバ増幅器は、例えばエルビウム元素が添加されたエルビウム元素添加光ファイバ増幅器が一般的である。エルビウム元素添加光ファイバ増幅器では、980nm波長帯(光周波数に換算すると、306.1THz帯に相当)または1480nm波長帯(光周波数202.7THz帯に相当)などの励起チャンネルを有する励起光をエルビウム元素が添加された光ファイバに入射させることで該エルビウム添加光ファイバ中に反転分布状態を発生させる。この反転分布状態が発生しているエルビウム添加光ファイバへ1550nm波長帯(光周波数193.5THz帯に相当)の信号光が入射されることにより、該信号光が増幅される。このような希土類元素添加光ファイバ増幅器の増幅帯域は、光ファイバに添加された希土類元素の種類によって決定される。例えばエルビウム添加光ファイバ増幅器の場合、増幅された信号光のパワーバラツキ(パワースペクトルの

平坦度)が1dB以内となる波長範囲は、1540nm(194.8THz)～1560nm(192.3THz)であり、さらにパワースペクトルの平坦度を補正する等化フィルタなどが適用されることで、該波長範囲は1530nm(196.1THz)～1560nm(192.3THz)とすることができた。

【0004】しかし、近年の逼迫した光通信システムの情報伝送能力向上の要求に対して、その能力向上を目的とした波長分割多重伝送における、信号光の高密度な多重化は限界に近づきつつある。このため、光通信システムの情報伝送能力の更なる向上に対しては、増幅された信号光のパワースペクトルが平坦になる増幅波長帯域(光周波数帯域)を拡大することが必要となってきた。

【0005】光ファイバ増幅器の他方のタイプであるラマン増幅器は、信号光が伝搬する伝送路の少なくとも一部を構成し、該信号光をラマン増幅する光ファイバに、例えば1400nm波長帯(光周波数214.3THz帯に相当)のそれぞれ中心波長を有する複数励起チャンネルの励起光を供給することで、該励起光の波長(光周波数)よりも100nm長波長側(13THz低光周波数側)となる波長帯域(光周波数帯域)に増幅ピークが得られるラマン散乱効果を利用している。

【0006】ラマン増幅器は、例えば励起光源としてエルビウム添加光ファイバ増幅器に一般的に用いられる1400nm波長帯(光周波数214.3THz帯に相当)の励起光源が利用された場合、1500nm波長帯(光周波数200.0THz帯に相当)の信号光をラマン増幅することができる。そして、このラマン増幅器は、複数の異なる波長(光周波数)の励起チャンネルの励起光を適宜用いれば、ラマン増幅後のラマン増幅信号光のパワースペクトルが平坦になる波長帯域(光周波数帯域)は、エルビウム添加光ファイバ増幅器に比べて大幅に拡大させることが可能である。特開2000-98433号公報には、異なる波長(光周波数)の励起チャンネルの励起光を発生する励起光発生部と、各励起チャンネルの励起光を合波するためのWDMカプラと、光増幅器の出力光(ラマン増幅された信号光)を検出し、その結果に基づいて励起光発生部を制御する光出力パワー制御部を備えている。増幅出力等化フィルタを必要としない程度に増幅の波長依存性を小さくするために励起光の中心波長の間隔は6nm以上35nm以下としている。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】発明者らは、従来のラマン増幅器について詳細に検討した結果、以下のような課題を発見した。すなわち、光増幅器の出力(光パワー)の波長依存性を平坦化するため、従来のラマン増幅器は、励起光の各励起チャンネル中心波長に約100nm加えた波長の出力光をモニタして、それら出力光のパワーを揃えるように各励起チャンネルの励起光のパワーを制御している。しかしながら、信号光が波長方向(光周波

数方向)に多重化された場合、互いに異なる中心波長(中心光周波数)の信号チャネル間におけるラマン増幅時の干渉により、ラマン増幅された多重化信号光であるラマン増幅信号光のパワースペクトルの平坦化に対しては不十分であった。このため、光通信システムの伝送能力の向上への対応が困難であった。

【0008】この発明は上述のような課題を解決するためになされたものであり、互いに中心光周波数の異なる複数信号チャネルを含む多重化された信号光をラマン増幅する場合であっても、互いに中心光周波数の異なる複数励起チャネルを含む励起光によってラマン増幅されたラマン増幅信号光のパワースペクトルが、波長方向(光周波数方向)に対して平坦になるラマン増幅器、このラマン増幅器の制御方法、及びこのラマン増幅器を含む光通信システムを提供することを目的としている。

【0009】なお、この明細書では、適宜、光の波長に換えて光周波数によって表記する。光の波長と光周波数の換算式は、 $\nu\lambda=c$ である。ここで、 ν は光周波数(Hz)、 λ は波長(m)、 c は光速であって 3×10^8 (m/s)となる。

【0010】

【課題を解決するための手段】上述の目的を達成すべく、この発明に係るラマン増幅器は、ラマン増幅用光ファイバと、励起光供給部と、フィードバック部とを備える。上記ラマン増幅用光ファイバは、互いに中心光周波数の異なる複数信号チャネルの信号光をラマン増幅するための光ファイバを含む。上記励起光供給部は、互いに中心光周波数の異なるN(2以上の整数)個の励起チャネルの励起光を上記光ファイバに供給する。上記フィードバック部は、励起光が供給されることにより光ファイバ内においてラマン増幅されたラマン増幅信号光の一部を検出し、その検出結果に基づいて該ラマン増幅信号光のパワースペクトルが、光周波数方向に対して実質的に平坦なよう上記励起光供給部を制御する。

【0011】特に、上記フィードバック部は、ラマン増幅信号光のパワースペクトル平坦化を実現するため、検出されたラマン増幅信号光を励起光の励起チャネルそれぞれの中心光周波数から13、5〜15、7THzの光周波数シフト分だけ小さい光周波数となるラマン増幅ピークを1つ含むよう規定されたN個の光周波数範囲に区分し、該区分されたN個の光周波数範囲それぞれにおけるラマン増幅信号光のパワーバラツキが2dB以下、好ましくは1dB以下になるよう上記励起光供給部を制御する。この明細書において、ラマン増幅信号光のパワーバラツキは、ラマン増幅帯域におけるラマン増幅信号光の最大パワーと最小パワーの差で与えられ、該ラマン増幅信号光のパワースペクトルの平坦度を意味する。

【0012】上記フィードバック部は、検出されたラマン増幅信号光を励起光の励起チャネル数と同数の光周波数範囲に区分し、該区分された光周波数範囲それぞれに

含まれるラマン増幅信号光のパワー平均値バラツキが2dB以下、好ましくは1dB以下になるよう上記励起光供給部を制御してもよい。

【0013】当該ラマン増幅器によれば、光周波数方向に多重化された複数信号チャネルを含む信号光をラマン増幅する場合にであっても、ラマン増幅信号光のパワースペクトルの平坦化を容易に実現できる。

【0014】なお、上記フィードバック部によるN個の光周波数範囲の区分は、上記整数N=2のときと、上記整数Nが3以上のときに分けて、以下のように設定することもできる。

【0015】すなわち、上記前記整数N=2のとき、フィードバック部がラマン増幅信号光を検出する際に区分するN個の光周波数範囲のうち第1番目の光周波数範囲は、N個の励起チャネルのうち大きい方の第1中心光周波数と小さい方の第2中心光周波数との中間光周波数から約15THz(光周波数シフト)小さい光周波数を下限とする一方、該第1中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第1中心光周波数よりも大きい光周波数から約15THz小さい光周波数を上限とする範囲に設定される。さらに、フィードバック部がラマン増幅信号光を検出する際に区分するN個の光周波数範囲のうち第2番目の光周波数範囲は、第1中心光周波数と第2中心光周波数との中間光周波数から約15THz小さい光周波数を上限とする一方、該第2中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第2中心光周波数よりも小さい光周波数から約15THzさらに小さい光周波数を下限とする範囲に設定されるのが好ましい。

【0016】さらに、上記整数Nが3以上であって、励起光におけるN個の励起チャネルのうち最も中心光周波数の大きい励起チャネルを第1励起チャネルとし、中心光周波数の大きい方から第n(2以上の整数)番目の中心光周波数の励起チャネルを第n励起チャネルとし、そして、最も中心光周波数の小さい励起チャネルを第N励起チャネルとするとき、フィードバック部がラマン増幅信号光を検出する際に区分するN個の光周波数範囲のうち第1番目、第n(2以上(N-1)以下の整数)番目、そして第N番目の光周波数範囲は、それぞれ以下の範囲に設定されるのが好ましい。すなわち、第1番目の光周波数範囲は、第1励起チャネルの中心光周波数と第2励起チャネルの中心光周波数との中間光周波数から約15THz(光周波数シフト)小さい光周波数を下限とする一方、該第1励起チャネルの中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第1励起チャネルの中心光周波数よりも大きい光周波数から約15THz小さい光周波数を上限とする範囲に設定される。第n番目の光周波数範囲は、第n励起チャネルの中心光周波数と第(n+1)励起チャネルの中心光周波数との中間光周波数から約15THz小さい光周波数を下限とする一方、該第n励起チャネルの中心光周波数と第(n-1)励起チャネルの中

心光周波数との中間光周波数から約 1.5 THz 小さい光周波数を上限とする範囲に設定される。そして、第 N 番目の光周波数範囲は、第 N 励起チャンネルの中心光周波数と第 (N-1) 励起チャンネルの中心光周波数との中間光周波数から約 1.5 THz 小さい光周波数を上限とする一方、該第 N 励起チャンネルの中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第 N 励起チャンネルの中心光周波数よりも小さい光周波数から約 1.5 THz さらに小さい光周波数を下限とする範囲に設定される。

【0017】 上述のように N 個の光周波数範囲が、それぞれ励起チャンネルに対応したラマン増幅ピークを含む光周波数範囲として設定されるので、各励起チャンネルの中心光周波数や励起チャンネル数に変動してもラマン増幅信号光のパワースペクトル平坦性が安定的に制御される。具体的に、各励起チャンネルの中心光周波数に変動するケースには、励起チャンネルのうちいずれかの励起チャンネルの励起光パワーが低下するケースが含まれる。この場合、上記フィードバック部は、励起光をモニタする光検出部と、該励起光を供給する励起光源を制御する制御部を備えるのが好ましい。上記光検出部は、ラマン増幅信号光のパワーとともに励起チャンネルの各中心光周波数における励起光パワーをモニタする。上記制御部は、該光検出部の検出結果に基づいて、ラマン増幅信号光を該励起チャンネルと同数の光周波数範囲に区分する際、該光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数を決定する。特に、上記制御部は、光検出部がラマン増幅に実効的に寄与しない程度の微弱なパワーの励起チャンネルの発生を検出したとき、該微弱パワーの励起チャンネルを除いた残りの励起チャンネルを利用して、光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数を変更する。一方、励起チャンネル数の増加が検出されたとき、すなわち、光検出部がラマン増幅に実効的に寄与し得る程度の強力なパワーの励起チャンネルの発生を検出したとき、上記制御部は、該強力パワーの励起チャンネルを含む全励起チャンネルを利用して、光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数を変更する。なお、上記光検出部は、複数信号チャンネルの前記ラマン増幅信号光と複数励起チャンネルの前記励起光が多重化された多重化モニタ光を検出するオプティカルパフォーマンスモニタを含むのが好ましい。

【0018】 この発明に係るラマン増幅器において、励起光における各励起チャンネルの中心光周波数の間隔は、4 THz 以下であるのが好ましい。互いに中心光周波数の異なる N 個の励起チャンネルの励起光によるラマン増幅帯域が光周波数方向に対し互いに近接して重畳されるため、ラマン増幅信号光のパワースペクトル平坦性を向上させることができる。

【0019】 上記フィードバック部は、ラマン増幅信号光の一部を受光し、該ラマン増幅信号光のパワーに応じた電気信号を出力する光検出部と、光検出部から出力された電気信号に従って励起光供給部を制御する制御部と

を備える。このとき、上記光検出部は、オプティカルパフォーマンスモニタを含むのが好ましい。これにより、光検出部はラマン増幅信号光の受光精度が高くなり、ラマン増幅信号光のパワースペクトル平坦性を高精度に制御できるとともに、該ラマン増幅信号光のパワースペクトル平坦性を向上させることもできる。

【0020】 上記光検出部は、ラマン増幅信号光を N 個の光周波数範囲に分波する分波部と、この分波部により分波されたラマン増幅信号光それぞれを受光する受光部とを備えてもよい。このとき、上記分波部は、誘電体光学フィルタを備えた光回路、及び、光サーキュレータとブラッグ回折格子を備えた光回路のいずれかを含むのが好ましい。受光部を誘電体からなる光学フィルタで構成することでラマン増幅信号光を N 個の互いに異なる光周波数範囲への分波が低コストで実現できる。また、受光部の光回路を光サーキュレータ及びブラッグ回折格子で構成することでラマン増幅信号光を N 個の互いに異なる光周波数範囲への分波が低コストで実現でき、さらには受光精度を高めることができる。

【0021】 この発明に係るラマン増幅器の制御方法は、上述のような構造を備えたラマン増幅に対して、ラマン増幅信号光のパワースペクトルを光周波数方向に対して平坦にする。具体的に、当該制御方法は、励起光をラマン増幅用ファイバに供給し、ラマン増幅された信号光（ラマン増幅信号光）の一部を検出し、検出されたラマン増幅信号光のパワースペクトルを光周波数方向に対して平坦にする。

【0022】 上記励起光は、互いに中心光周波数の異なる N (2 以上の整数) チャンネルを含む。ラマン増幅信号光の平坦化は、検出されたラマン増幅信号光を励起光のチャンネルそれぞれの中心光周波数から 1.3、5 ~ 1.5、7 THz の光周波数シフト分だけ小さい光周波数となるラマン増幅ピークを 1 つ含むよう規定された N 個の光周波数範囲に区分し、上記励起光供給部を制御することにより、該区分された N 個の光周波数範囲それぞれにおけるラマン増幅信号光のパワーバラツキを 2 dB 以下、好ましくは 1 dB 以下に抑える。

【0023】 なお、この発明に係る制御方法において、ラマン増幅信号光の平坦化は、検出されたラマン増幅信号光を励起光の励起チャンネル数と同数の光周波数範囲に区分し、上記励起光供給部を制御することにより、該区分された光周波数範囲それぞれに含まれるラマン増幅信号光のパワー平均値バラツキが 2 dB 以下、好ましくは 1 dB 以下に抑えられる。

【0024】 当該制御方法によれば、ラマン増幅信号光を所定の光周波数範囲に区分して、これら区分された光周波数範囲間の信号光パワーバラツキを最小化するように構成されているので、光周波数方向に多重化された信号光をラマン増幅する場合であっても、ラマン増幅信号光のパワースペクトル平坦化を容易に行うことができる。

【0025】N個の光周波数範囲の区分は、上記整数N=2のときと、上記整数Nが3以上のときに分けて、上述のように設定してもよい。N個の光周波数範囲は、N個の互いに中心光周波数の異なる励起チャンネルそれぞれの中心光周波数から約15THz（光周波数シフト）小さい光周波数となるラマン増幅ピークを1つ含む。また、ラマン増幅ピークそれぞれは、予め区分された光周波数範囲の中間付近に位置している。したがって、各励起チャンネルの中心光周波数や励起チャンネル数が変動してもラマン増幅信号光のパワースペクトル平坦性を安定的に制御することができる。具体的に、各励起チャンネルの中心光周波数が変動するケースには、励起チャンネルのうちいずれかの励起チャンネルの励起光パワーが低下するケースが含まれる。この場合、当該制御方法では、ラマン増幅信号光が励起チャンネルと同数の光周波数範囲に区分される際、該励起チャンネルの各中心光周波数における励起光パワーの検出結果に基づいて、該光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数が決定される。特に、励起チャンネルのうちラマン増幅に実効的に寄与しない程度の微弱なパワーの励起チャンネルの発生が検出されたときは、該微弱パワーの励起チャンネルを除いた残りの励起チャンネルを利用して、光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数が変更されるのが好ましい。一方、励起チャンネル数の増加が検出されたとき、すなわち、ラマン増幅に実効的に寄与し得る程度の強力なパワーの励起チャンネルの発生が検出されたとき、該強力パワーの励起チャンネルを含む全励起チャンネルを利用して、光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数が変更されるのが好ましい。

【0026】この発明に係る光通信システムは、信号光を伝送して光通信を行う光通信システムであって、各中継区間において信号光を増幅するために、上述のような構造を備えたラマン増幅器（この発明に係るラマン増幅器）と同様の構造を備えた1又はそれ以上のラマン増幅器を含む。

【0027】当該光通信システムによれば、中継時のラマン増幅信号光のパワースペクトルが光周波数方向に対して平坦になるため、光通信システムの情報伝送能力を高めながらも誤動作を効果的に抑制できる。換言すれば、情報伝送能力を高めながらも通信動作の安定した光通信システムが実現され得る。

【0028】

【発明の実施の形態】以下に、この発明に係るラマン増幅器等の各実施形態を、図1～図16を用いて説明する。なお、図面の説明において同一要素には同一の符号を付して重複した説明を省略する。

【0029】まず、この発明を完成するに至った経緯について説明する。図1は、多重化されていない信号光及び多重化された信号光それぞれを中心光周波数が201.3THzの励起チャンネルを含む励起光でラマン増幅したときのラマン増幅スペクトル（パワースペクトル）

である。

【0030】スペクトルAは、光ファイバを伝搬する信号光が光周波数方向に多重化されていない場合のラマン増幅スペクトルである。スペクトルAが最大増幅をとる光周波数は188.3THzであり、励起光の中心光周波数より13THz小さい。

【0031】一方、スペクトルBは、光ファイバを伝搬する信号光として、40信号チャンネルが186.3THzから195.8THzの範囲で光周波数方向に多重化された信号光をラマン増幅した場合のラマン増幅スペクトルである。スペクトルBが最大増幅をとる光周波数は、光周波数方向に多重化されていない信号光のケースとは異なって186.3THzである。この光周波数は、励起チャンネルの中心光周波数より15THz小さい。

【0032】さらに、図2～図5は、光ファイバを伝搬する信号光として、40信号チャンネルが186.3THzから195.8THzの範囲で光周波数方向に多重化された信号光を、互いに中心光周波数の異なる複数励起チャンネルの励起光を該光ファイバに供給することでラマン増幅した場合のラマン増幅スペクトルである。

【0033】図2は、中心光周波数がそれぞれ205.5THz、208.3THz、210.5THzである3個の励起チャンネルの励起光を利用したときのラマン増幅スペクトルであり、スペクトルa～cは、この順にそれぞれ中心励起周波数が205.5THz、208.3THz、210.5THzの励起チャンネルに対するラマン増幅スペクトルである。また、スペクトルCはスペクトルa～cを重ねることによって得られる重畳スペクトルである。図2において、スペクトルa～cそれぞれに関して最大増幅をとる光周波数は、励起チャンネルそれぞれの中心光周波数より15THz小さい。そして、スペクトルCにおいても3個の励起チャンネルそれぞれの中心光周波数より15THz小さい光周波数においてラマン増幅ピークC1～C3が存在する。

【0034】同様に、図3は、中心光周波数がそれぞれ201.3THz、205.5THz、208.3THz、210.5THzである4個の励起チャンネルの励起光を利用したケース、図4は、中心光周波数がそれぞれ201.3THz、205.5THz、206.9THz、209.1THz、210.5THzである5個の励起チャンネルの励起光を利用したケース、図5は、中心光周波数がそれぞれ201.3THz、205.5THz、206.9THz、209.1THz、210.5THzである6個の励起チャンネルの励起光を利用したケースにおいて、励起チャンネルそれぞれに対するラマン増幅スペクトルa～f及びこれらスペクトルa～fを重ねることによって得られる重畳ラマン増幅スペクトルD～Fである。図2と同様に、図3～図5においても、スペクトルa～fそれぞれに関して最大増幅をとる光周波数は、

各励起チャネルの中心光周波数より 15 THz 程度小さい。また、重畳スペクトル D~F においても、励起チャネルそれぞれの中心光周波数より 15 THz 小さい光周波数において、ラマン増幅ピーク D1~D4、E1~E5、F1~F6 が存在している。

【0035】図1~図5から分かるように、光周波数方向に多重化された複数信号チャネルの信号光のラマン増幅では、それぞれ中心光周波数の異なる信号チャネル間の干渉によって、最大ラマン増幅をとる光周波数が励起チャネルの中心光周波数に対して 15 THz 程度小さい光周波数となる。さらに、互いに中心光周波数が異なる複数励起チャネルに対するラマン増幅スペクトルを重畳することで得られる重畳ラマン増幅スペクトルにおいても、複数の励起チャネルそれぞれの中心光周波数に対して 15 THz 程度小さい光周波数においてラマン増幅ピークが存在する。

【0036】互いに中心光周波数が異なる複数励起チャネルの励起光を、ラマン増幅用光ファイバに入射し、光周波数方向に多重化された複数信号チャネルの信号光をラマン増幅したとき、ラマン増幅信号光のパワースペクトルを光周波数方向に平坦にするには、以下のように制御すればよいことが分かる。すなわち、図6に示されたように、励起チャネルそれぞれ（各励起チャネルの中心光周波数の間隔は、4 THz 以下であるのが好ましい）に対するラマン増幅スペクトルを重畳した重畳ラマン増幅スペクトルに見られるラマン増幅ピーク（各励起チャネルの中心光周波数に対して 15 THz 程度の光周波数シフト分だけ小さい光周波数に存在）を、それぞれひとつ含むよう光周波数範囲を区分し、該区分された光周波数範囲におけるラマン増幅信号光のパワーバラツキを所定の範囲、例えば 2 dB 以下、好ましくは 1 dB 以下にするよう、各光周波数範囲に含まれるラマン増幅ピークに対応する励起光の出力を制御することである。これにより、複数励起チャネルの励起光でラマン増幅される広い光周波数帯域においてラマン増幅信号光のパワースペクトル平坦化が実現される。この発明は、以上のような発明者らの知見に基づいてなされたものである。

【0037】次に、この発明に係るラマン増幅器及びラマン増幅器の制御方法について説明する。図7は、この発明に係るラマン増幅器の第1実施形態の構成を示す図である。図7において、当該ラマン増幅器10は、伝搬する信号光をラマン増幅する光ファイバ11と、該光ファイバ11に励起光を供給する励起光供給部12と、ラマン増幅された信号光（ラマン増幅信号光）を検出し、該検出結果に基づいてラマン増幅信号光のパワースペクトルを光周波数方向に対して平坦にするよう、励起光供給部12を制御するフィードバック部13を備える。なお、信号光は、互いに中心光周波数が異なる複数信号チャネルを含み、例えば中心光周波数がそれぞれ光周波数で 100 GHz 間隔である 40 信号チャネルの多重化さ

れた信号光である。

【0038】光ファイバ11は、入力端11a及び出力端11bを備え、信号光が入力端11aから出力端11bへ伝搬する間、励起光供給部12から供給される励起光によって該信号光をラマン増幅する。

【0039】励起光供給部12は、励起光を出力する励起光源12aと、該励起光を光ファイバ11へ導くための合分波器12bと、励起光源12aから出力された励起光を合波器12bへ導く光ファイバ12cを備える。

【0040】励起光源12aは、N個（Nは整数で $N \geq 2$ ）の互いに中心光周波数の異なる励起光（励起チャネル）を出力する。励起光源12aはN個の互いに中心光周波数の異なる励起光を出力する発光素子及び該発光素子から発せられた光を光ファイバ11へ合波させるための光ファイバ及び光合波器を備えてもよい。この場合、N個の互いに中心光周波数の異なる励起光を出力する各発光素子は、例えば活性領域を挟んで相対向する光反射面と光射出面が形成された半導体発光素子であってもよく、また、励起光源12aの外部から発光素子ごとに駆動信号が供給される。そして、適宜、各発光素子に供給される駆動信号が変えられることにより、各発光素子の励起光の出力パワーが調整される。ここで、励起光に含まれる励起チャネルは、大きい中心光周波数のチャネルから順に第n番目（nは1以上N以下の整数）の励起チャネルとする。

【0041】光合分波器12bは、光ファイバ11の入力端11aと出力端11bとの間に配置され、入力端11a側から伝搬してくる信号光を出力端11b側へ通過させるとともに、励起光源12aから光ファイバ12cを介して到達した励起光を光ファイバ11へ導く。光ファイバ11内へ導かれた励起光は、光ファイバ11を該光合分波器12bから入力端11aの方向へ向かって伝搬し、入力端11aから伝搬してくる信号光のラマン増幅に寄与する。入力端11aから伝搬してくる信号光は励起光源12aから励起光が供給されることでラマン増幅され、該ラマン増幅信号光が光合分波器12bへ向かって伝搬する。光合分波器12bを通過したラマン増幅信号光は、さらに出力端11bへ向かって伝搬する。

【0042】フィードバック部13は、光ファイバ11内でラマン増幅されたラマン増幅信号光の一部を分光する分光器13aと、該分光器13aで分光されたラマン増幅信号光を検出する光検出部14と、該光検出部14で検出された結果に基づいてラマン増幅信号光のパワースペクトルを光周波数方向に対して平坦にするよう励起光源12aを制御する制御部13eを備える。また、分光器13aと光検出部14は光ファイバ13cを介して光学的に接続され、光検出部14と制御部13eは電気信号ライン13dを介して電氣的に接続され、制御部13eと励起光源12aは電気信号ライン13fで電氣的に接続されている。

【0043】分光器13aは、光合分波器12bと出力端11bとの間に配置され、ラマン増幅信号光の殆どを出力端11b側へ通過させるとともに、ラマン増幅信号光の一部を光ファイバ13cへ導く。光ファイバ13cへ導かれたラマン増幅信号光の光パワーは、光合分波器12b側から光ファイバ11を伝搬し分光器13aへ到達するラマン増幅信号光の光パワーの5%程度である。

【0044】光検出部14は、分光器13aで分光されたラマン増幅信号光を受光し、該ラマン増幅信号光の光パワーに応じた電気信号を電気信号ライン13dを介して制御部13eへ出力する。

【0045】制御部13eは、演算処理機能を有する半導体集積回路素子などで構成され、光検出部14から供給された電気信号に基づき、ラマン増幅信号光のパワースペクトルを光周波数方向に対して平坦にするための駆動信号レベルを算出する。そして、制御部13eは、算出されたレベルの駆動信号をライン13fを介して励起光源12aへ供給する。

【0046】ここで、当該ラマン増幅器及びラマン増幅器の制御方法において、フィードバック部13は、ラマン増幅信号光をN個の互いに中心光周波数の異なる複数チャンネルの中心光周波数からそれぞれ15THz小さい光周波数となるラマン増幅ピークを1つ含むよう設定されたN個の光周波数範囲に区分し、これら光周波数範囲の信号光に基づく検出値が、実質的に互いに等しくなるよう、例えば各光周波数範囲におけるラマン増幅信号光のパワーバラツキが2dB以下、好ましくは1dB以下になるよう励起光供給部12を制御する。より具体的には、光検出部14は、信号光をN個の互いに中心光周波数の異なる励起チャンネルに対応したラマン増幅ピークをひとつ含むよう設定されたN個の光周波数範囲ごとに、ラマン増幅信号光を受光する。さらに光検出部14は、該N個の光周波数範囲それぞれにおける受光されたラマン増幅信号光の光パワーに応じた電気信号を制御部13eへ出力する。制御部13eは、N個の光周波数範囲ごとに受け取った電気信号の平均値を算出する。そして該N個の電気信号の平均値が実質的に等しくなるよう、例えばパワーバラツキが2dB以下、好ましくは1dB以下になるよう励起光源12aを制御するための駆動信号レベルを算出する。算出されたレベルの駆動信号は、この制御部13eから励起光源12aへ電気信号ライン13fを介して供給される。したがって、N個の中心光周波数の異なる励起チャンネルの励起光により、光周波数方向に多重化された信号光がラマン増幅された場合でも、ラマン増幅信号光のパワースペクトルを光周波数方向に対して平坦にすることができる。なお、光検出部14は、受光したラマン増幅信号光の光パワーと光周波数との相関が認識できるよう制御部13eへ電気信号を供給する。制御部13eは、ラマン増幅信号光をN個の互いに中心光周波数の異なる励起チャンネルに対してそれぞれ

15THz程度小さい光周波数に見られるラマン増幅ピークを1つ含むよう設定されたN個の光周波数範囲ごとに区分させるようにしてもよい。

【0047】なお、上記フィードバック部によるN個の光周波数範囲の区分は、上記整数N=2のときと、上記整数Nが3以上のときに分けて、以下のように設定される。

【0048】すなわち、上記前記整数N=2のとき、フィードバック部がラマン増幅信号光を検出する際に区分するN個の光周波数範囲のうち第1番目の光周波数範囲は、N個の励起チャンネルのうち大きい方の第1中心光周波数と小さい方の第2中心光周波数との中間光周波数から約15THz（光周波数シフト）小さい光周波数を下限とする一方、該第1中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第1中心光周波数よりも大きい光周波数から約15THz小さい光周波数を上限とする範囲に設定される。さらに、フィードバック部がラマン増幅信号光を検出する際に区分するN個の光周波数範囲のうち第2番目の光周波数範囲は、第1中心光周波数と第2中心光周波数との中間光周波数から約15THz小さい光周波数を上限とする一方、該第2中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第2中心光周波数よりも小さい光周波数から約15THzさらに小さい光周波数を下限とする範囲に設定される。

【0049】さらに、上記整数Nが3以上であって、励起光におけるN個の励起チャンネルのうち最も中心光周波数の大きい励起チャンネルを第1励起チャンネルとし、中心光周波数の大きい方から第n（2以上の整数）番目の中心光周波数の励起チャンネルを第n励起チャンネルとし、そして、最も中心光周波数の小さい励起チャンネルを第N励起チャンネルとするとき、フィードバック部がラマン増幅信号光を検出する際に区分するN個の光周波数範囲のうち第1番目、第n（2以上（N-1）以下の整数）番目、そして第N番目の光周波数範囲は、それぞれ以下の範囲に設定される。すなわち、第1番目の光周波数範囲は、第1励起チャンネルの中心光周波数と第2励起チャンネルの中心光周波数との中間光周波数から約15THz（光周波数シフト）小さい光周波数を下限とする一方、該第1励起チャンネルの中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第1励起チャンネルの中心光周波数よりも大きい光周波数から約15THz小さい光周波数を上限とする範囲に設定される。第n番目の光周波数範囲は、第n励起チャンネルの中心光周波数と第（n+1）励起チャンネルの中心光周波数との中間光周波数から約15THz小さい光周波数を下限とする一方、該第n励起チャンネルの中心光周波数と第（n-1）励起チャンネルの中心光周波数との中間光周波数から約15THz小さい光周波数を上限とする範囲に設定される。そして、第N番目の光周波数範囲は、第N励起チャンネルの中心光周波数と第（N-1）励起チャンネルの中心光周波数との中間光周波数から

約 15 THz 小さい光周波数を上限とする一方、該第 N 励起チャンネルの中心光周波数と該中間周波数との差だけ該第 N 励起チャンネルの中心光周波数よりも小さい光周波数から約 15 THz さらに小さい光周波数を下限とする範囲に設定される。

【0050】上述のように、N 個の光周波数範囲は N 個の互いに中心光周波数の異なる励起チャンネルに対応してラマン増幅ピークをそれぞれひとつ含み、それらラマン増幅ピークは、各光周波数範囲の中間付近に位置して検出される。したがって、各励起チャンネルの中心光周波数が環境温度の変化等により変動してもラマン増幅信号光の

【0051】次に、図 8～図 10 は、図 7 に示されたラマン増幅器 10 において、中心光周波数がそれぞれ 186.3 THz から 195.8 THz の範囲である 40 信号チャンネルの信号光を、中心光周波数がそれぞれ 201.3 THz、204.8 THz、206.9 THz、208.8 THz、210.5 THz である 5 励起チャンネルの励起光でラマン増幅した場合において、該 5 励起チャンネルの中心光周波数それぞれに対して、14 THz、15 THz、16 THz だけ小さい光周波数が中間付近となるよう 5 個の光周波数範囲に区分し、該区分された各光周波数範囲におけるラマン増幅信号光の光パワー検出結果に基づいて励起光源 12a を制御したときのラマン増幅スペクトルである。入力端 11a における信号光のパワーは 8 dBm/ch とし、出力端 11b におけるラマン増幅信号光のパワーは 0 dBm/ch を目標とした。そして、逆方向励起である 5 励起チャンネルの中心光周波数における励起光パワーの初期値はどれも 100 mW である。また、光ファイバ 11 の入力端 11a から光合分波器 12b までの長さは 80 km である。

【0052】ラマン増幅信号光に含まれる各信号チャンネルのパワーバラツキは、図 9 の光周波数シフトが 14 THz であるケースで 1.23 dB、図 10 の光周波数シフトが 16 THz であるケースで 2.75 dB であった。これに対し、図 8 の光周波数シフトが 15 THz であるケースでは 1.07 dB であった。これより、励起チャンネルそれぞれの中心光周波数から 15 THz 程度小さい光周波数が中間付近となるよう、ラマン増幅信号光検出のための光周波数範囲を区分することが、ラマン増幅信号光のポワースペクトルを光周波数方向に対して平坦とするために有利であることが分かる。なお、パワーバラツキは、ラマン増幅帯域におけるラマン増幅信号光の最大パワーと最小パワーとの差で与えられる。

【0053】発明者らは、上述のように光周波数シフトと利得バラツキ（ラマン増幅信号光のパワーバラツキ）の関係について検討した。図 11 は、光周波数シフトと利得バラツキとの関係を示すグラフである。このグラフからも分かるように、ラマン増幅信号光のパワーバラツキを 2 dB 以下に抑えるためには、光周波数シフトは 1

3.5～15.7 THz の範囲であるのが好ましく、さらに該パワーバラツキを 1 dB 以下に抑えるためには、該光周波数シフトは 14.3～14.7 THz の範囲であるのが好ましい。

【0054】なお、上記光検出部 14 は、例えば光スペクトルアナライザなどのオプティカルパフォーマンスモニタであってもよい。このように、光検出部 14 に光スペクトルアナライザなどのオプティカルパフォーマンスモニタが適用されると、光周波数の分解精度が高くなるため、高精度にラマン増幅信号光を検出することができる。したがって、ラマン増幅信号光のポワースペクトル平坦化を高精度に制御でき、該ポワースペクトルの平坦性が向上する。加えて、光検出部 14 に光スペクトルアナライザなどのオプティカルパフォーマンスモニタが適用されると、分光器 13a で分光されたラマン増幅信号光を更に分光あるいは分波することなく検出することが可能なため、分光器 13a で分光するラマン増幅信号光のパワーは僅かであり、この場合、特に、ラマン増幅信号光を効率良く出力端 11b から取り込めるのでラマン増幅器の増幅効率を高めることができる。

【0055】光検出部 14 は、信号光を分光する分光部と分光したラマン増幅信号光を受光して電気信号に変換する受光部を備える。なお、分光部は誘電体材料などで形成された光学フィルタを備えた光回路、あるいは、光サーキュレータ及びブラッグ回折格子などを備えた光回路を含んでもよい。この場合、受光部はフォトダイオードのような半導体受光素子が適用可能である。なお、図 12(a) 及び図 12(b) は、光検出部 14 の他の構成を示す図である。図 12(a) において、光検出部 14 は、光ファイバ 13c を伝搬してきたラマン増幅信号光を各信号チャンネルに分離するための誘電体材料などで構成された光フィルタ 140 と、該光フィルタ 140 からそれぞれ出力された信号チャンネルの光を受光し、各光パワーに応じた電気信号を電気信号ライン 13d を介して制御部 13e に出力する受光部 141 を備える。一方、図 12(b) において、光検出部 14 は、光ファイバ 13c を伝搬してきたラマン増幅信号光を各信号チャンネルに分離するためのサーキュレータ 142 と、該サーキュレータ 142 から分離された各分岐線路に配置され、固有の光周波数のみ通過させるブラッググレーティング 143 と、該ブラッググレーティング 143 を通過した信号チャンネルの光を受光し、各光パワーに応じた電気信号を電気信号ライン 13d を介して制御部 13e に出力する受光部 141 を備える。

【0056】分光部 13a を誘電体材料からなる光学フィルタを備えた光回路とすると、安価に光回路を構成することができる。一方、分光部 13a を光サーキュレータ及びブラッグ回折格子などを備えた光回路とすると、上記光学フィルタを備えた光回路と比べブラッグ回折格子の有する光周波数方向に対する急峻な光パワー遮断特

性により光周波数の分解精度が高くなり、高精度にラマン増幅信号光を検出することができる。加えて、上記光スペクトルアナライザなどのオプティカルパフォーマンスモニタを用いた場合に比べても安価に分光部13aを構成することができる。

【0057】さらに、図1から、ひとつの中心光周波数の励起チャンネルにより平坦なラマン増幅が得られる光周波数帯域は4THzであることが分かる。よって、N個の励起チャンネルの中心光周波数間隔が4THz以下に設定されれば、N励起チャンネルの励起光によりラマン増幅された各増幅帯域が光周波数方向に互いに近接して重畳されるため、ラマン増幅信号光のパワースペクトル平坦性が向上する。

【0058】この発明に係るラマン光増幅器は以下のように動作する。励起光供給部12における励起光源12aから出力された互いに中心光周波数の異なるN個の励起チャンネルの励起光は、光合分波器12bを経て光ファイバ11へ供給され入力端11aに向かって伝搬する。一方、信号光は光ファイバ11の入力端11aから入力され、励起光によってラマン増幅される（ラマン増幅信号光）。ラマン増幅信号光は、光合分波器12bを通過して分光器13aへ到達する。分光器13aへ入力されたラマン増幅信号光は、その殆どが光ファイバ11を伝搬して出力端11bから出力される。一方、該ラマン増幅信号光の一部は光ファイバ13cを伝搬して光検出部14に到達する。

【0059】ここで、フィードバック部13は、ラマン増幅信号光をN個の励起チャンネルの中心光周波数それぞれから15THz程度小さい光周波数となるラマン増幅ピークを1つ含むよう設定されたN個の光周波数範囲に区分し、各光周波数範囲のラマン増幅信号光に基づく検出値が互いに等しくなるよう、例えば各光周波数範囲におけるラマン増幅信号光のパワーバラツキが2dB以下、好ましくは1dB以下となるよう励起光供給部12を制御する。

【0060】以上説明したように、当該ラマン増幅器10では、光検出部14がラマン増幅信号光をN個の光周波数範囲に区分して検出する。そして、制御部13eは光検出部14が検出したそれぞれの光周波数範囲の検出値を等しくするよう励起光供給部12を制御する。したがって、各信号チャンネルが光周波数方向に多重化された信号光がラマン増幅される場合でも、ラマン増幅信号光のパワースペクトルを光周波数方向に対して平坦にすることができる。

【0061】さらに、図13は、この発明に係るラマン増幅器の第2実施形態の構成を示す図である。この第2実施形態に係るラマン増幅器は、励起チャンネル数が変動した場合でも光検出部14において検出される各光周波数範囲の検出値のバラツキ（ラマン増幅信号光のパワーバラツキ）が2dB以下、好ましくは1dB以下となる

よう励起光光源12を制御するための構成を備えたことを特徴とする。

【0062】具体的には、励起光供給部12は、複数励起チャンネルの励起光を出力するための励起光光源12a、該励起光を光ファイバ11へ導くための光合分波器12bと、該励起光の一部をモニタ光として分離するための光合分波器12eとを備える。励起光光源12aは、互いに異なる中心光周波数の励起光を出力するためのLD122と、各励起チャンネルごとに不要な波長成分を除去するためのグレーティング121と、各励起チャンネルの励起光を合波するための合波器120とを、備える。

【0063】一方、フィードバック部13の光検出部14はオプティカルパフォーマンスモニタ（OPM）を含み、該OPMでラマン増幅信号光のパワーの他、励起光のパワーもモニタするため、該励起光の一部を光ファイバ13cに導くための光合分波器130がさらに設けられるとともに、光合分波器12e、130間が光ファイバ12dを介して接続されている。

【0064】この第2実施形態において、制御部13eは、光検出部14の検出結果に基づいて、励起光光源12aを光ファイバ13fを介して制御するが、ラマン増幅信号光を該励起チャンネルと同数の光周波数範囲に区分する際、該光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数を決定する。特に、制御部13eは、光検出部の検出結果に基づいて、ラマン増幅に実効的に寄与しない程度の微弱なパワーの励起チャンネルの発生を検出したとき、該微弱パワーの励起チャンネルを除いた残りの励起チャンネルを利用して、光周波数範囲それぞれの境界を示す光周波数を変更する。

【0065】図14(a)は、4励起チャンネルの励起光が供給されたときのラマン利得（ラマン増幅信号光のパワースペクトル）である。供給される励起チャンネルの各中心光周波数は、202.3THz（1481.9nm）、205.4THz（1459.5nm）、207.0THz（1448.3nm）、208.2THz（1439.9nm）である。図14(a)において、スペクトルa～dは、これら各励起チャンネルの励起光によるラマン増幅スペクトルであり、スペクトルGは、これらスペクトルa～dを重ねることにより得られる重畳スペクトルである。この重畳スペクトルGでは、各励起チャンネルに対応してラマン増幅ピーク（各励起チャンネルの中心光周波数から15THz程度小さい光周波数）G1～G4が存在する。このように4励起チャンネルの励起光が供給される場合、制御部13eは、ラマン増幅信号光を光周波数範囲S1、S2に区分して、各光周波数範囲におけるラマン増幅光のパワーバラツキあるいはパワー平均値バラツキを抑えるよう励起光光源122を制御する。

【0066】一方、図14(b)は、上記4励起チャネ

ルのうち中心光周波数 207.0 THz (1448.3 nm) の励起チャンネルを出力する LD が故障した場合における制御部 13e の制御結果を示している。すなわち、供給される励起チャンネルの各中心光周波数は、202.3 THz (1481.9 nm)、205.4 THz (1459.5 nm)、208.2 THz (1439.9 nm) である。図 14 (b) のケースでは、スペクトル c が存在しないため、制御部 13e は、光周波数範囲 S1 を広げて再区分し、中心光周波数 208.2 THz の励起チャンネルの励起光パワーを大きくするよう LD 122 を制御する。これにより、スペクトル a、b、d を重畳することにより得られる重畳スペクトル G (ラマン増幅信号光のパワースペクトル) の平坦化が達成されることが分かる。なお、この重畳スペクトル G では、各励起チャンネルに対応してラマン増幅ピーク (各励起チャンネルの中心光周波数から 15 THz 程度小さい光周波数) G1、G2、G4 が存在する。

【0067】励起チャンネルのいずれかにおいて励起光パワーが低下するケースとしては、例えば、LD チップの経時劣化、温度調節回路の故障、ファイバ破断などが想定され得る。上述の図 14 (a) 及び図 14 (b) の例では、光周波数 207.0 THz の励起チャンネルの励起パワーが通常の 1/10 程度に低下し、実効的に 202.3 THz、205.4 THz 及び 208.2 THz の残りの 3 励起チャンネルとなった場合に、OPM14 により各励起チャンネルがモニタされているので、信号光のモニタ区分を、図 14 (a) に示された区分から図 14 (b) に示された区分に変更し、残りの 3 励起チャンネルの各励起パワーを調節し直すことにより、ラマン利得の平坦化が実現できる。

【0068】一方、光ネットワークでは、加入者の需要変化やネットワークの故障などに応じて、信号チャンネル数の変動が生じるケースが考えられる。仮に、通信容量の需要が本格化せず、光周波数 192.5~194.5 THz (周波数 1542~1558 nm に相当) の信号光が未使用であった場合、図 15 に示されたように、光周波数 208.2 THz の励起チャンネルを OFF にしておけばよい。逆に、図 15 に示された状態 (3 励起チャンネルによるラマン増幅) から、通信容量の増加が発生した場合、図 14 (a) に示されたような 4 励起チャンネルによるラマン増幅を行えるよう信号光のモニタ区分を変更すれば、通信容量の増加前と増加後のいずれにおいてもラマン利得の平坦性が維持される。

【0069】なお、励起光を供給する励起光光源の ON/OFF による励起チャンネル数の変動が発生しない場合であっても、該励起光光源への供給電流や波長安定化用のファイバグレーティングへ加わる歪み等の影響で、各励起チャンネルの中心光周波数が変化する可能性もある。上述のようなケースを含め、これら励起パワーの変動はシステム稼働時に予期せず発生する場合がある。したが

って、システム保守の観点から、制御部 13e が、全励起チャンネルのモニタリング及び信号光区分の算出を繰り返し行いながら励起制御を行うのが好ましい。

【0070】次に、この発明に係る光通信システム 20 について説明する。図 16 は、この発明に係る光通信システム 20 は、送信局 21 と受信局 22 の間に中継局 23 が配置されており、送信局 21 と中継局 23 の間の中継区間、中継局 23 と受信局 22 との間の中継区間には、それぞれ光ファイバ 24、25 が敷設されている。また中継局 23 には上述のような構造を備えたラマン増幅器 10 が配置されている。

【0071】光通信システム 20 において、互いに中心光周波数の異なる複数信号チャンネルの信号光が送信局 21 から光ファイバ 24 へ送出される。そして、送出された信号光はラマン増幅器 10 でラマン増幅された後、光ファイバ 25 を伝搬して受信局 22 へ到達する。この実施形態に係る光通信システム 20 では、上記ラマン増幅器 10 を含むので、互いに中心光周波数の異なる複数信号チャンネルの信号光 (多重化された信号光) による光通信においても受信局 22 でラマン増幅信号光を正確に受信することができる。

【0072】なお、この実施形態に係る光通信システム 20 では、送信局 21 と受信局 22 との間に 1 つの中継局 23 が配置されているが、中継局 23 は送信局 21 と受信局 22 との距離に応じて、複数の中継局が配置されてもよい。また、この実施形態に係る光通信システム 20 では、上記ラマン増幅器 10 を中継局 23 の内部に設けたが、中継局 23 の内部に励起光供給部 12 及びフィードバック部 13 のみを設けて、励起光供給部 12 から供給される励起光を光ファイバ 24 へ供給するような構成であってもよい。この場合、光ファイバ 24 が信号光をラマン増幅する光ファイバとして機能する。

【0073】

【発明の効果】以上のようにこの発明によれば、互いに中心光周波数の異なる複数信号チャンネルの信号光をラマン増幅するための光ファイバと、互いに中心光周波数の異なる N 個 (2 以上の整数) の励起チャンネルの励起光を該光ファイバに供給する励起光供給部と、励起光が供給されることによりラマン増幅されたラマン増幅信号光の一部を検出し、その検出結果に基づきラマン増幅信号光のパワースペクトルが光周波数方向に対して実質的に平坦になるよう励起光供給部を制御するフィードバック部とでラマン増幅器が構成される。特に、フィードバック部は、検出されたラマン増幅信号光を励起チャンネルそれぞれの中心光周波数から約 15 THz 小さい光周波数となるラマン増幅ピークを 1 つ含むよう規定された N 個の光周波数範囲に区分し、該区分された N 個の光周波数範囲それぞれにおけるラマン増幅信号光のパワーバラツキが 2 dB 以下になるよう励起光供給部を制御する。これ

により、互いに中心光周波数の異なる複数信号チャネルの多重化された信号光が伝送される場合にであっても、ラマン増幅信号光のパワースペクトルを光周波数方向に対して平坦にすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 多重化されていない信号光及び多重化された信号光それぞれを中心光周波数が 201.3 THz の励起チャネルを含む励起光でラマン増幅したときのラマン増幅スペクトルである。

【図 2】 多重化された信号光を互い中心光周波数が異なる 3 励起チャネルの励起光でラマン増幅したときのラマン増幅スペクトルである。

【図 3】 多重化された信号光を互い中心光周波数が異なる 4 励起チャネルの励起光でラマン増幅したときのラマン増幅スペクトルである。

【図 4】 多重化された信号光を互い中心光周波数が異なる 5 励起チャネルの励起光でラマン増幅したときのラマン増幅スペクトルである。

【図 5】 多重化された信号光を互い中心光周波数が異なる 6 励起チャネルの励起光でラマン増幅したときのラマン増幅スペクトルである。

【図 6】 多重化された信号光をモニタリングするための光周波数範囲の設定方法を説明するための図である。

【図 7】 この発明に係るラマン増幅器における第 1 実施形態の構成を示す図である。

【図 8】 励起光に含まれる各励起チャネルの中心光周波数それぞれに対して 15 THz 小さい光周波数が中間となるよう光周波数範囲が設定されたケースについて、多重化された信号光を互い中心光周波数が異なる 5 励起チャネルの励起光でラマン増幅したときのラマン増幅スペクトル (パワーバラツキは 1.07 dB) である。

【図 9】 励起光に含まれる各励起チャネルの中心光周波数それぞれに対して 14 THz 小さい光周波数が中間と

なるよう光周波数範囲が設定されたケースについて、多重化された信号光を互い中心光周波数が異なる 5 励起チャネルの励起光でラマン増幅したときのラマン増幅スペクトル (パワーバラツキは 1.23 dB) である。

【図 10】 励起光に含まれる各励起チャネルの中心光周波数それぞれに対して 16 THz 小さい光周波数が中間となるよう光周波数範囲が設定されたケースについて、多重化された信号光を互い中心光周波数が異なる 5 励起チャネルの励起光でラマン増幅したときのラマン増幅スペクトル (パワーバラツキは 2.77 dB) である。

【図 11】 光周波数シフトと利得バラツキ (ラマン増幅信号光のパワーバラツキ) の関係を示すグラフである。

【図 12】 この発明に係るラマン増幅器における光検出部の他の構成を示す図である。

【図 13】 この発明に係るラマン増幅器における第 2 実施形態の構成を示す図である。

【図 14】 多重化された信号光のラマン増幅において、チャネル数の変化前 (チャネル数は 4) と変化後 (チャネル数は 3) におけるラマン増幅スペクトルである。

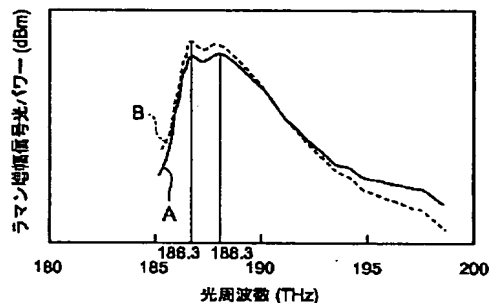
【図 15】 多重化された信号光のラマン増幅において、チャネル数の変化前 (チャネル数は 3) におけるラマン増幅スペクトルである。

【図 16】 この発明に係る光通信システムにおける一実施形態の構成を示す図である。

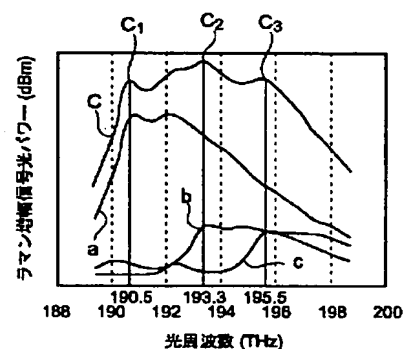
【符号の説明】

10、23 a …ラマン増幅器、11、12 c、13 c、24、25 …光ファイバ、11 a …入力端、11 b …出力端、12 …励起光供給部、12 a …励起光光源、12 b …光合分波器、13 …フィードバック部、13 a …分光器、13 e …制御部、13 d、13 f …電気信号ライン、14 …光検出部、21 …送信局 22 …受信局、23 …中継局。

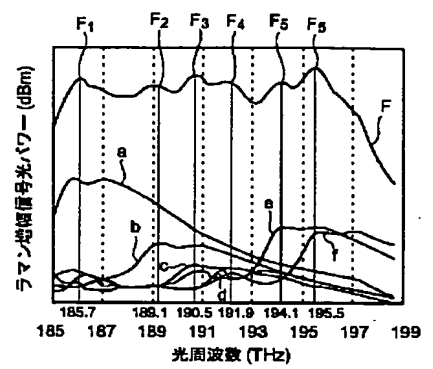
【図 1】



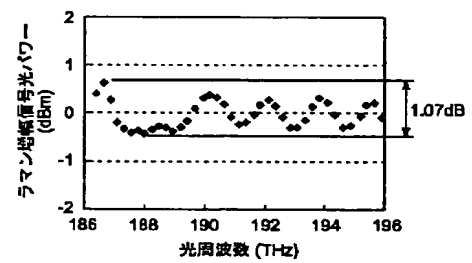
【図 2】



【図5】



【图8】



【図 9】

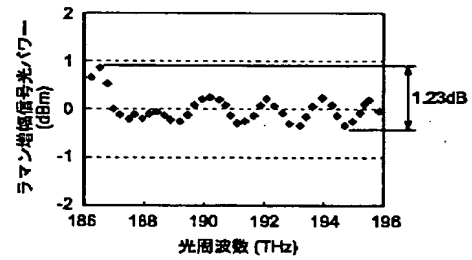
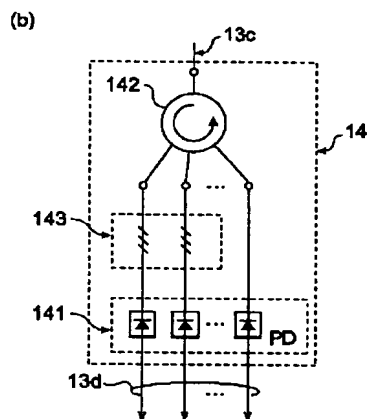
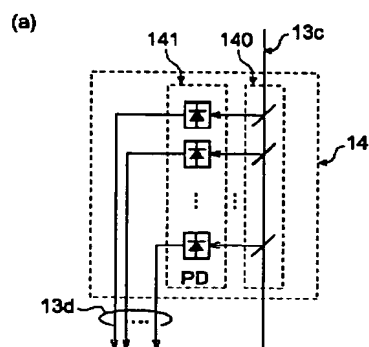
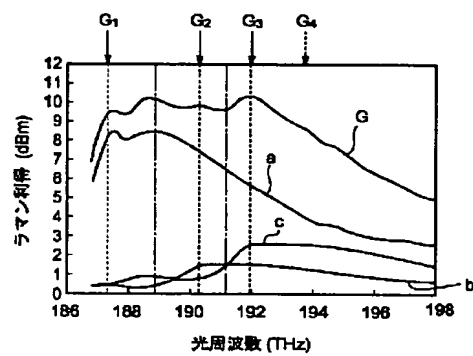
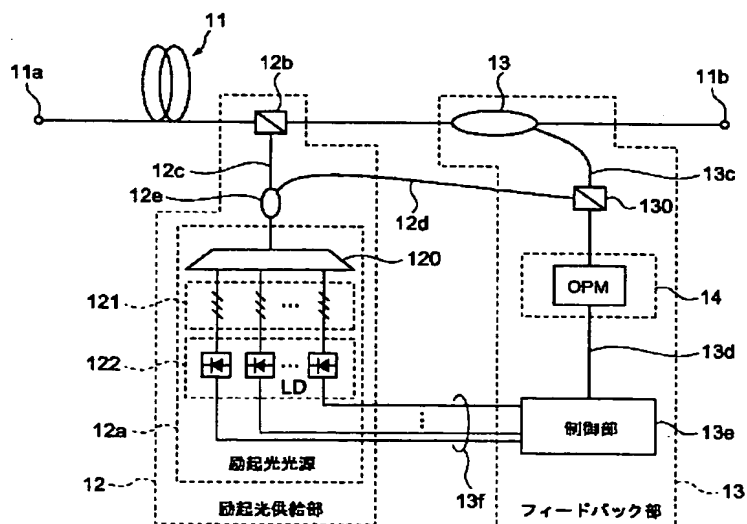


Figure 1 is a scatter plot showing the relationship between the optical frequency (光周波数) in THz on the x-axis and the Raman gain power (ラマン増幅信号パワー) in dBm on the y-axis. The x-axis ranges from 186 to 196 THz, and the y-axis ranges from -2 to 2 dBm. The data points show a fluctuating trend with a peak around 194 THz. A vertical double-headed arrow on the right indicates a range of 2.75 dB.

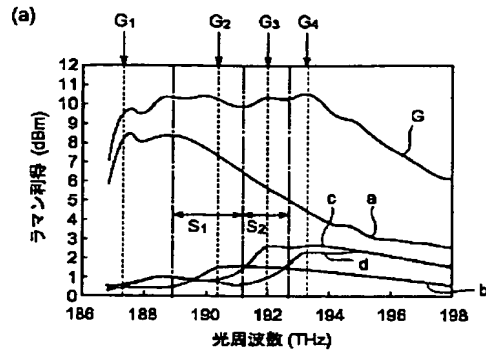
【图 1 2】



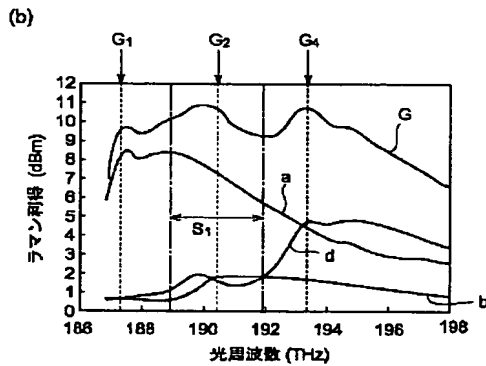
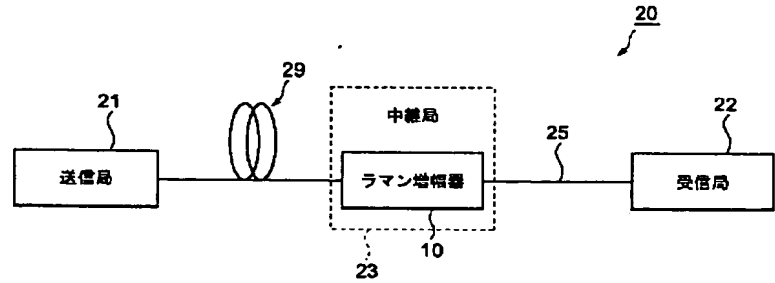
【图 15】



【図 14】



【図 16】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2K002 AA02 AB30 BA04 CA15 DA10
 EB12 EB15 HA23
 5F072 AB07 AK06 HH02 PP07 QQ07
 YY17
 5K102 AA55 AD01 MA03 MB03 MB05
 MB06 MC03 MC14 MD01 MH04
 MH13 PH14